九州大学医学部保健学科紀要，2007，第８号，23－32
Memoirs Dep. of Health Scis. Sch. of Med Kyushu Univ., 2007, vol.8, 23-32

資　料

半導体式線量計（S.W. 社製 DOSIMAX plus）の有用性

赤坂　勉[1)]

A utility of the dosimeter using semiconductor detector
－ Scaditronix Wellhöfer DOSIMAX plus －

Tsutomu Akasaka

キーワード：半導体式線量計，品質管理，線量計の校正

Ⅰ　はじめに

この度シリコンpin形フォトダイオードを検出器とし，電離電流を測定して吸収線量値（Gy）を表示させる半導体式線量計を３台導入，'05年度以降の学生実験において大きな教育効果をあげることができた.

さらに，非常に簡便に線量測定を行うことができ，日常的な線量測定用としても満足すべき特性をもつことが確認できた. また, トレーサビリティが効いた線量計の値との道筋も確立でき，活用範囲は益々広がったと考える.

今後の活用のための参考資料として，空気電離箱式線量計と比較しながら得られた結果を報告したい.

１．半導体式線量計について

半導体検出器は，放射線により空乏層内に生じた電子正孔対の電荷を検出するもので，空気電離箱に対して固体電離箱とも呼ばれる.

空気中で１イオン対生成に要する平均エネルギー（$\overline{W}$値）は約34 eVであるが，半導体検出器では電子正孔対生成に必要なエネルギーはシリコンで3.6 eV，ゲルマニウムでは2.8 eVと低く，このため高感度で小型な検出器を製造することができる. この特性は生成される電子正孔対数のゆらぎが非常に小さくなることにつながり，分解能に優れた検出器としてエネルギースペクトルの解析に用いられている.

半導体検出器のうち，先の空乏層に相当する真性半導体領域（intrinsic region，i層）をもたせたものはpin形と呼ばれ，pn接合形のように空乏層形成のために逆電圧を印可する必要がなく，加える電圧は電荷収集のためだけでよい.[1)]

以上はパルス波高分析用途での優れた特性であるが，放射線誘起電流を測定するモードもあり，これは特に個人被ばく管理用測定器として普及している.[2)]

今回報告する半導体式線量計はこの原理に基づいたもので，本来的に高い測定精度が要求されるX線出力の品質管理（Quality Control）を目的として製造されたものである.

２．本線量計導入の経緯

従来, 本学で線量測定を要する項目においては, ポケット線量計や蛍光量計が用いられてきた. 精密測定用の空気電離箱式線量計では，測定デザインの変更が頻繁な測定環境や粗雑な取扱いには不向きなためもあった. しかし，ポケット線量計は精度が低く，X線増感紙の蛍光量を検出する蛍光

１）九州大学医学部保健学科・放射線技術科学専攻

量計の場合は，必然的にエネルギー依存性に対する取扱いが線量評価への直感性に歯止めをかけていた．

このため，小型・堅牢で簡便に取扱え，高精度な直読型線量計の導入が望まれた．この条件を満足する線量計として見出されたものが本線量計である．

３．本線量計の取扱い上の特長について

・検出器が小型で堅牢である．

空気電離箱は繊細な取扱いが必要であるが，本線量計の検出器は小型で堅牢なため取扱いが容易であるとともに，測定デザインの制約を受けにくい利点がある．また，空気電離箱式線量計はデシケータ内に保管しなければならないが，本線量計ではその必要はない．

・温度気圧補正が不要である．

空気電離箱では測定場の大気条件により指示値が変動するが，本線量計では通常の大気条件ではこれは考えなくてよい．

・測定器の操作に要する時間が不要である．

本線量計は直ちに測定モードに立上げることができ，測定時はオートリセットやオートレンジにより測定器の操作が全く不要である．空気電離箱式線量計では，測定準備や測定時の操作に相応の時間を要する．

・空気電離箱式線量計に比し，安価である．

このほか，固体線量計の一種である熱蛍光線量計や蛍光ガラス線量計と比較したとき，検出素子の取扱いの煩雑さや線量読取りに至るまでの時間を考えれば，即時に指示値が得られ，検出素子の取扱いに対する面倒さがない点で本線量計の利便性は極めて高い．

Ⅱ　本線量計の概要

外観をfig.1に示す．

名　称　独）Scanditronix Wellhöfer社製
　　　　DOSIMAX plus
　　　　検出器：同上type RQX

※以下本文中ではDOSIMAXと略す．

本線量計の仕様については，末尾に記す．

Ⅲ　特性を比較した空気電離箱式線量計と使用X線装置

空気電離箱式線量計

検出器　米）Capintec社製　診断X線領域用
　PM-30　No.309491（'00年購入）
　・有効体積：28ml

検出器と読取り器

検出器

読取り器の表示部

fig. 1 DOSIMAX plus の外観

・壁材と壁厚：空気等価プラスチック 0.25 mm厚
・サイズ：31mmϕ×48mm長

読取り器 米）Victreen社製 Radcon 500-S1 No.1170 GyまたはC表示

※以下文文中ではこれらをPM30 & Radconと略す.

X線装置

・X線装置：島津UD150L-3（インバータ形）
・X線管：島津CIRCLEX 0.6/1.2 P38DE-80SF（tube 1）
・可動絞り：島津R-20，0.5mm A*l*付加フィルタは除いた.
・ろ過値はX線管が約1.5mm A*l*当量，可動絞りは約1mm A*l*当量である.

Ⅳ 試験方法と実験結果

下記の項目について試験した.

1）指示値の変動性
2）減弱曲線の作成と半価層の読取り
3）PM30 & Radconの校正と，DOSIMAX値の比較（エネルギー依存性を含む）
4）方向依存性
5）同機種３台の指示値比較

※試験管電圧は通常の診断X線領域を用い，30kV前後の低電圧については行なっていない.

1）指示値の変動性

PM30 & Racon と同時照射しながら指示値の変動を調べた.

方 法

測定配置：水平ビームを用いて，焦点から 1m の距離に両検出器を並べて配置し，照射野は 4 × 9cm とした.

X 線照射条件：60・80・100kV － 大焦点 100mA － 0.1sec とした.

上記の条件それぞれで10回づつ照射を行い，指示値を読取った.（JIS規定におけるX線出力の再現性を表す変動係数の項目では，連続した10回の空気カーマ測定量で算出するよう規定されており，これに準拠した. [3]）

結 果

指示値の変動をtable 1に示す．表中の誤差%は平均値に対する各指示値の相対誤差%を，変動係数は平均値に対する標準偏差の%を表す.

いづれの管電圧でも，各値の誤差%や変動係数はPM30 & Radcon のそれを上回ったが，

table 1 指示値の変動

単位 mGy

	60 k V				80 k V				100 k V			
測定回	PM30	誤差%	DOSIMAX	誤差%	PM30	誤差%	DOSIMAX	誤差%	PM30	誤差%	DOSIMAX	誤差%
1	0.3706	0.05	0.3724	-0.08	0.6360	-0.27	0.6484	-0.23	0.9503	0.15	0.9817	0.18
2	0.3710	0.16	0.3732	0.13	0.6367	-0.16	0.6483	-0.25	0.9494	0.05	0.9819	0.20
3	0.3702	-0.05	0.3726	-0.03	0.6367	-0.16	0.6473	-0.40	0.9492	0.03	0.9819	0.20
4	0.3703	-0.03	0.3725	-0.05	0.6385	0.13	0.6511	0.18	0.9487	-0.02	0.9778	-0.21
5	0.3706	0.05	0.3719	-0.21	0.6382	0.08	0.6506	0.11	0.9480	-0.09	0.9781	-0.18
6	0.3700	-0.11	0.3727	0.00	0.6397	0.31	0.6527	0.43	0.9490	0.01	0.9786	-0.13
7	0.3700	-0.11	0.3726	-0.03	0.6377	0.00	0.6503	0.06	0.9486	-0.03	0.9816	0.17
8	0.3702	-0.05	0.3726	-0.03	0.6378	0.02	0.6499	0.00	0.9475	-0.15	0.9779	-0.20
9	0.3704	0.00	0.3733	0.16	0.6373	-0.06	0.6507	0.12	0.9489	0.00	0.9778	-0.21
10	0.3702	-0.05	0.3727	0.00	0.6379	0.03	0.6498	-0.02	0.9491	0.02	0.9821	0.22
平均値	0.3704		0.3727		0.6377		0.6499		0.9489		0.9799	
標準偏差	0.0003		0.0004		0.0011		0.0016		0.0008		0.0020	
変動係数	0.08%		0.11%		0.17%		0.24%		0.08%		0.21%	

DOSIMAXの誤差％は最大でも±0.4％程度，変動係数も0.11～0.24％と非常に小さなものであった．

さらに，旧式のX線装置である単相２ピーク形を用いて変動係数を求めたところ，80kVで両線量計とも約3％であった．このことからも実験に用いたインバータ形X線装置の出力変動が極めて少ないことがわかる．

２）減弱曲線の作成と半価層の読取り

JIS「線量測定器の校正方法」に規定された，実効エネルギーを求めるための半価層測定方法に準拠して行った．[4)]

方　法

測定配置：水平ビームを用いて，X 線管焦点から 3m の距離に検出器をおき，同じく 0.5m に Al 吸収板を配置した．照射野は検出器位置で 6 × 6cm とした．

X 線照射条件：60・80・100・120kV －大焦点 200 mA － 0.2sec とした．

Al吸収板は高純度のもの（99.99%）を用いた．測定はそれぞれの線量計で別個に行った．

以上の条件で，吸収板の厚さを変えながら，吸収板がないときの線量（I_0）に対する吸収板があるときの線量（I）の比（I／I_0）を測定した. なお，半価層付近については別個に，より緻密に吸収板の厚さを変えながら測定した．

結　果

得られた減弱曲線をfig. 2に示す．

各管電圧における半価層値とこれより得られた実効エネルギーをtable 2に示す．（70・90・110kV のものは内捜値である．）

table2　管電圧と半価層，実効エネルギーの関係

	Al半値層mm		実効エネルギー（keV）	
管電圧（kV）	PM30&Radcon	DOSIMAX	PM30&Radcon	DOSIMAX
60	2.28	2.36	30.0	30.5
70	2.62	2.71	31.7	32.2
80	2.97	3.07	33.4	33.8
90	3.34	3.45	35.0	35.5
100	3.71	3.85	36.6	37.2
110	4.08	4.24	38.2	38.8
120	4.45	4.63	39.7	40.5

半価層と実効エネルギーとの関係は次のようにして求めた．即ち，光子エネルギーと質量減弱係数（μ/ρ）の関係表[5)]に密度を乗じて線減弱係数（μ）との関係に直したものを，半価層＝log e0.5/μの関係式より光子エネルギーと半価層との関係に変換，グラフ内捜より実効エネルギーを読取った．

この結果，DOSIMAXによる半価層は，PM30 & Radconによるものを0.08mm（60kV）～0.18mm（120kV）上回り，管電圧が高いほど差が大となった．PM30 & Radconによる値を上回ったのは，検出器の壁材や厚さの違いにより，DOSIMAX検出器での線質が若干硬くなったためと思われる．これより得られた実効エネルギーは，120kVでPM30 & Radconによる値より0.8keV高くなったほかは，他の管電圧では0.4～0.6keVの差であった．
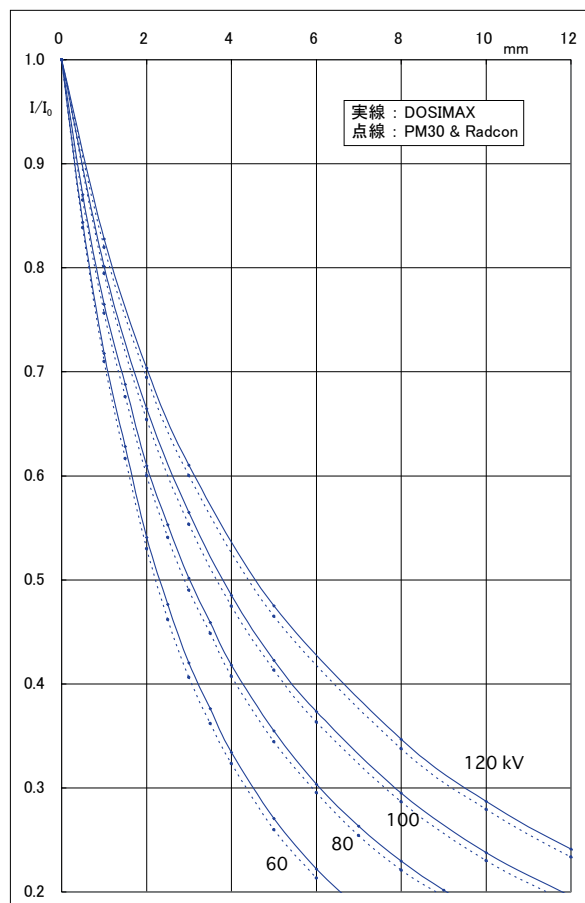
fig. 2　A ι による減弱曲線

3）PM30 & Radcon の校正と，これに対する DOSIMAX値の比較

DOSIMAXの取扱説明書には，DIN（Deutsche Industrie Norm，ドイツ工業規格）による線質ごとの校正定数が示され，指示値にこれを乗じるよう記載されているが，詳細が不明瞭であり，直接に校正定数を求めることにした．

このとき，①まず標準的な線量値によってPM30 & Radcon の校正を行い，②次いでPM30 & Radcon値とDOSIMAX値を比較した．

①PM30 & Radconの校正

校正用線量計は九州大学病院・放射線部に設置されている空気電離箱線量計を用いた．これは，財）日本品質保証機構・計量計測センターによる，国家標準とトレーサブルな標準器との校正結果を有する．当線量計は，社）日本放射線技術学会の委託のもと，診断X線用の九州地区での標準線量計として活用されているものである．

PM30は，’00年に診断X線領域用として購入されたものであるが，購入後一度も校正されたことがなく，今後の活路を期待するためにも今回の校正は有用であったと考える．校正操作の詳細を述べておく．

方　法

通常の校正作業を行っている九州大学病院放射線部のX線ビームを用いた．

測定配置：水平ビームを用い，X 線管焦点－検出器中心間距離を 1.5m として，同時照射した．このとき，両検出器はヒール効果の影響を避けるため，X 線管短軸方向の直線上に配置させ，照射野は検出器位置で 10 × 20cm とした．

X 線照射条件：40 ～ 120kV における読取りに適切な管電流と照射時間を選んだ．このとき校正用線量計の校正時の線質と同じにすべく，総計 1.5mm の Al フィルターが付加された．

結　果

校正結果をtable 3に示す．

表中のAl半値層は用いたX線の実測値を，実効エネルギーは 2）に述べた方法で求めたものを示す．指示値は３回測定して平均値を求めた．さらに校正用線量計の指示値には次の補正係数を乗じて真値とした．

- 温度気圧補正係数は，校正用線量計の校正時の大気条件（1013hPa，22℃）に対し，今回は1009.5hPa，26.5℃であったため，これを 1.019とした．
- 校正定数は校正証書記載のものを用いた．
- 校正用線量計のC/kg表示からGyへの変換係数には，33.97［$Gy \cdot C^{-1} \cdot kg$］を用いた．

結果，PM30 & Radconの値はいずれも真値よりも低くなった．さらに，管電圧が高くなるほど校正定数も低下していったが，常用管電圧（70～120kV）では真値に非常に近い値を示した．

②PM30 & RadconとDOSIMAX値の比較

方　法　今回の実験全般に用いた本学のＸ線ビームで行った．

測定配置：水平ビームを用い，X 線管焦点－検出器中心間距離を 2m とした．両検出器は X 線管短

table3　PM30&Radconの校正用線量計による校正結果

管電圧 kV	Al半値層 mm	実効エネルギー keV	校正用線量計の真値 μGy	PM30&Radconの大気補正値 μGy	PM30&Radconの校正定数
40	1.67	26.5	476.2	461.4	1.032
50	2.18	29.5	609.0	597.8	1.019
70	3.00	33.5	1389.4	1379.8	1.0070
80	3.45	35.5	607.9	604.8	1.005
90	3.85	37.2	777.6	776.1	1.002
100	4.24	38.8	274.0	273.9	1.000
120	4.97	41.8	1026.7	1026.1	1.0006

軸方向の直線上に配置させ，照射野は検出器位置で 8 × 15cm とした．

X 線照射条件：60 〜 120kV の 10kV おきについて，大焦点 100mA，0.1sec．で照射した．

結　果

各管電圧での校正結果をtable 4に示す．

表中のAl半値層と実効エネルギーは，2）で述べたPM30 & Radconのものである．指示値は３回測定して平均値を求め，PM30 & Radconの指示値には次の補正係数を乗じて真値とした．

- 温度気圧補正係数は，校正時の大気条件（1009.5hPa，26.5℃）に対し，今回は 1018.5hPa，24.5℃であったため，これを0.985とした．
- 各実効エネルギーに対する校正定数は，①におけるエネルギー特性よりグラフ内捜で求めた．

結果，DOSIMAXの値は70，80kVを境に，低管電圧では真値よりも低く，高管電圧では高くなった．また，DOSIMAXの感度（校正定数の逆数）は，管電圧の上昇とともにゆるやかに高くなり，空気電離箱と似たエネルギー特性をもつことがわかったが，感度の変動はPM30 & Radconよりも大であった．

臨床現場では，通常皮ふの被ばく量を低減する目的で付加フィルターが装着されているが，人体への照射を行わない本学では付加フィルターは用いていない．これは実験項目①と②における同じ管電圧での実効エネルギーの違いにも現れており，今後 X線質を問題にする場合には，この点に注意しなければならない．

４）方向依存性

本線量計は検出器が小型であるため，例えばファントーム内での線量測定に用いることも可能である．方向依存性の確認は入射方向がランダムな散乱X線の検出に対して重要である．

方　法

測定配置：水平ビームを用い，X 線管焦点－検出器間距離は 3m とした．照射野は検出器位置で 10 × 10cm とした．

X 線照射条件：60 〜 120kV の 20kV おき－大焦点 200mA － 0.2sec とした．

X線の入射方向を一定とし，検出器を回転させることで入射方向を変化させた．（入射窓のマークが付いた面を前面とし，ステム軸を中心に回転させた．）

結　果

前面に垂直にX線が入射したときの角度を０°とし，このときの検出感度を100％とした比感度との関係をfig. 3に示す．（90°は側面への入射，180°は後面への入射となる．）

結果，いづれの管電圧でも90°までは感度は低下していき，以後180°まではしだいに上昇していった．また，いづれの角度でも管電圧が高いほど感度は高くなったが，120kVでは90°で10％，180°では30数％もの感度をもつことがわかった．

さらに，上面および下面（ステム側）の検出感度についても調べたが，これは無視できるほどに小さかった．

以上述べたように入射角度によって感度は大きく変化し，指示値は全方向からの積分値を示すこ

table4　DOSIMAXとPM30&Radconの比較測定結果

管電圧 kV	Al半値層 mm	実効エネルギー keV	PM30&Radcon の真値μGy	DOSIMAX値 μGy	DOSIMAX の校正定数
60	2.28	30.0	89.8	88.4	1.02
70	2.62	31.7	121.3	121.0	1.002
80	2.97	33.4	155.1	156.2	0.993
90	3.34	35.0	194.5	198.1	0.982
100	3.71	36.6	231.2	237.0	0.976
110	4.08	38.2	273.1	282.5	0.967
120	4.45	39.7	311.2	322.6	0.965

とがわかった．多方向からの線量付加がある測定では，方向依存性を充分考慮しなければならないが，反面，前面以外を鉛板で覆えば，ある程度の指向性をもたせることができるであろう．

5）同機種３台の指示値比較

同じ照射場における３台の指示値の違いについて調べた．検出器のケーブルと読取り器は容易に取り外しができ，自由に組合せを変えることもできるが，実験では添付の校正証書に記載された組で用いた．

方　法

鉛直ビームを用い，検出器を床上に置いてX線管間との距離は1.95 mとした．照射野は検出器位置で15×15cmとした．

検出器はビーム中心部で同心円上に集中的に配置し，照射条件は80kV－大焦点200mA－0.2secとして，５回の測定を行った．

結　果

各組の平均値に対する誤差％は，５回とも1）で述べた変動を下回っていた．

これまでに述べた試験項目は，検出器・読取り器とも製造番号の最も小さなものの組合せで行ってきた．この組の指示値を100％とした他組の比感度を求めたところ，製造番号が次の組では＋1.2％，さらにその次の組では＋0.3％と，第２組の感度が若干高い結果となった．
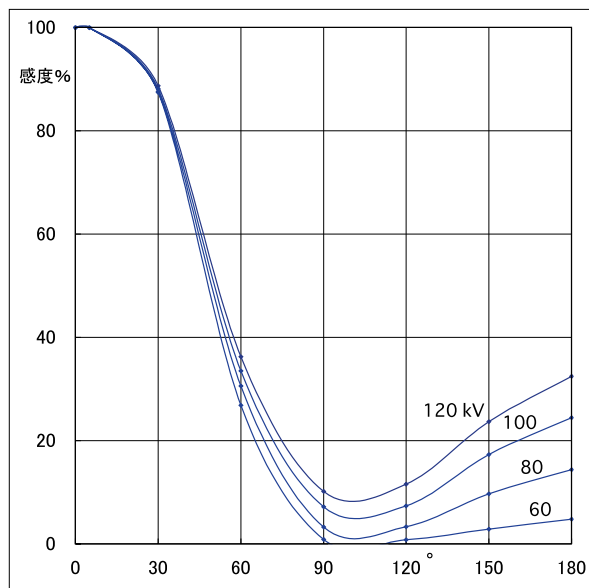
fig. 3　方向依存性

Ⅴ　本線量計の使用結果について

1）X線出力の品質管理用モニタとして

撮影用設定タイマおよび管電流の変化と線量指示値との直線性について調べた．

方　法

測定配置：水平ビームを用い，X線管焦点－検出器間距離は1mとした．照射野は検出器位置で7×7cmとした．

X線照射条件

・80kV一定－大焦点100mA－撮影用タイマを5msec～1secに変化させた．

・80kV一定－タイマ0.1sec－管電流を小焦点10～200mA，大焦点100～320mAに変化させた．

結　果

以上の関係をグラフ化したものを fig. 4 に示すが，いづれも良好な直線性を示した．タイマと線量の関係については，比較のため単相２ピーク形についても測定したが，0.1sec以上ではほぼ良好な直線性が得られたものの，0.1sec以下では大きくばらついて満足な直線性は得られなかった．

2）学生実験への導入結果について

’05年度以降の画像技術学実習においては，「X線量の距離逆２乗則の検証」，「散乱X線含有率の測定」や，「管電圧変化によるX線量と被写体コントラストの変化を調べる実験」に用いられた．

また放射線管理学実験においては，「しゃへい材のしゃへい効果の検証」，「医療被ばくの低減策とその効果を調べる実験」に用いられた．

いづれの実験でも高精度の結果を即座に得ることができ，教育効果に対する有用性が充分に確認できた．
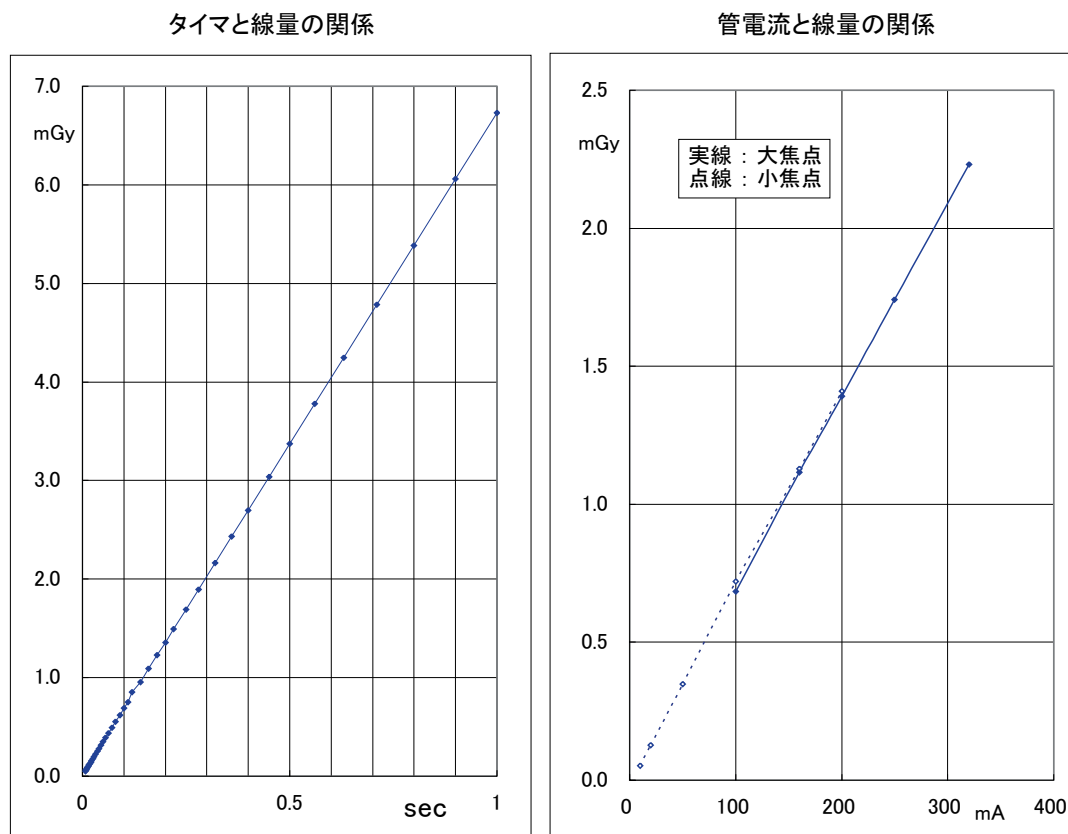
fig. 4　設定タイマ，管電流と線量指示値の関係

Ⅵ　結　語

空気電離箱式線量計と比較しながら得られた本線量計の基本的な特性は，以下のとおりであった．

1）インバータ形X線装置の出力測定では，変動係数は空気電離箱式線量計のそれを上回ったものの，１％を大きく下回る結果を示した．

2）Al半価層は，空気電離箱式線量計での値より0.08mm（60kV）～0.18mm（120kV）大きな値となった．

3）エネルギー特性は空気電離箱式と似た傾向を示したが，感度変動は空気電離箱式より大であった．70，80kVでは空気電離箱式に極めて近い値であったが，高管電圧になるほど高感度となり，120kVでは3.5％高くなった．

4）方向依存性は入射方向に対して大きく変化し，120kVでは側面や後面への入射に対しても比較的大きな感度をもつことがわかった．

5）保有した３台のDOSIMAX間の感度差は，最大1.2％であった．

本器は，X線出力の品質管理用途は言うまでもなく，線量測定が必要な学生実験において，また日常的な線量計としても，取扱いが簡便で高精度な線量計として充分に活用できることが確認できた．

今後の課題として，マンモグラフィなど低電圧X線領域での特性の検証が残ったが，当資料が本器の利用に際していくらかでも役に立てば幸いである．

本線量計の仕様

検出器の仕様

・pin形シリコンフォトダイオードの電離電流を誘起する．

・使用管電圧：50～150kVおよび25～35kV

・測定レンジ：5nGy～9999mGy（線量率100nGy/s～120mGy/s）

・サイズおよび重量：20×45×8mm厚，40g

読取り器の仕様

・測定値切換：線量Gy／線量率Gy/s／照射時間sec
・液晶デジタル表示：4桁の数値＋小数点＋単位
・オートリセット（前回の表示は次のX線入射で自動的にリセットされる.）
・オートレンジ（単位表示が自動的に切換わる.）
・オートパワーオフ（操作やX線の入射がないとき，表示が3分後に，電源が10分後にオフとなる.）
・電　源　　　：単3乾電池×4本
・サイズ・重量：90×145×35mm厚，290g（電池込み）

電源キーを押すといくらかのロゴ表示の後，約７秒で測定準備完了に至る．X線入力が検出トリガーの閾値を超えてから自動的に撮影モードでの測定が開始されるが，入力が２秒以上になると自動的に透視モードに切換わり，20秒間の測定が行われる．(このとき20秒以上はX線入力が継続される必要があり，短いとエラーコードが表示される.）

線量率（Gy/s）表示は，線量を照射時間で除した単なる計算値であり，透視X線のような連続した入力の線量率を刻々に表示するものではない.

謝辞

電離箱式線量計の校正にご協力戴いた九州大学病院放射線部の橘昌幸氏に感謝申し上げたい.

引用文献

１）山田勝彦・野原弘基：放射線計測学：日本放射線技術学会編・診療放射線技術学体系，1983，210-217
２）G.F. KNOLL，木村・阪井訳：放射線計測ハンドブック（第3版）：日刊工業新聞社，2001，453-456
３）JIS Z4702「医用X線高電圧発生装置通則」，1999
４）JIS Z4511「照射線量測定器及び線量当量測定器の校正方法」，1999
５）光子減弱係数データブック：日本放射線技術学会・放射線医療技術学叢書（11），1995（National Institute of Standards and Technology（NIST），S.M. Seltzer and J.H. Hubbel「Photon Mass Attenuation Coefficients」の訳書）